

Ciencia e Ingeniería

Revista Interdisciplinaria de Estudios en
Ciencias Básicas e Ingenierías
ISSN 2389-9484

Año 2023, enero-junio, Vol. 10, N.º 2, e10279636
Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas y
Facultad de Ingeniería, Universidad de La Guajira
La Guajira, Riohacha, Colombia
<http://revistas.uniguajira.edu.co/index.php/cei>
Este documento fue depositado en Zenodo. DOI:
<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.10279636>

Jairo Cesar Camargo Mendoza

<https://orcid.org/0009-0004-7701-1071>
jcesarcamargo@uniguajira.edu.co
Universidad de La Guajira
Riohacha, Colombia

Jairo Rene Escobar Villanueva

<https://orcid.org/0000-0002-2558-3500>
jrescobar@uniguajira.edu.co
Universidad de La Guajira
Riohacha, Colombia

Marisol Santos-Acevedo

<https://orcid.org/0000-0003-2103-1108>
msantosa@uniguajira.edu.co
Universidad de La Guajira
Riohacha, Colombia

Nelson Valero Valero

<https://orcid.org/0000-0001-9186-6245>
nvalerov@uniguajira.edu.co
Universidad de La Guajira
Riohacha, Colombia

EVALUACIÓN DEL USO DE IMÁGENES RBG DE DRONES PARA EL ESTUDIO DE LA VEGETACIÓN ASOCIADA A ISLAS DE RECURSOS

Evaluating the use of RGB drone imagery to study vegetation associated with resource islands

RESUMEN

Las islas de recursos (IR) son arreglos estratégicos de vegetación en zonas áridas y semiáridas y el estudio de su estructura y dinámica es importante para entender su papel en la oferta de servicios ecosistémicos. Sin embargo, el trabajo de campo con metodologías convencionales está limitada por la severidad de las condiciones climáticas y dificultades técnicas para abarcar un área representativa de estudio mínima. Por lo tanto, evaluar metodologías alternativas indirectas basadas en la captura de datos geoespaciales puede aumentar la disponibilidad de información y facilitar su estudio. En este trabajo, se analizó la dinámica del cambio estructural interanual en IR de una zona semiárida de la península de La Guajira. La estrategia metodológica evaluada consistió en utilizar análisis en SIG de ortofotomosaicos en RGB adquiridos por un dron o vehículo aéreo no tripulado VANT. Se estimaron los cambios interanuales asociados con la fracción de cobertura vegetal utilizando el índice VARI, y el contenido de clorofila mediante el índice verdor triangular, en SIG. Los resultados muestran un mapa que describe el efecto de una mayor disponibilidad hídrica en un año con una anomalía climática sobre la cobertura vegetal. Además, el índice verdor triangular permitió hacer una inferencia sobre el papel del agua en la asimilación del nitrógeno, y por ende reflejando un incremento en la producción de clorofila. Finalmente, el uso de herramientas SIG permite obtener datos geoespaciales que describen la estructura y algunas funciones biológicas, de forma alternativa (menor tiempo y costos) a las metodologías tradicionales, permitiendo el seguimiento sistemático de activos ecológicos estratégicos como en este caso, la vegetación en las IR.

Palabras clave: VANT, sensores remotos, islas de recursos, índices de vegetación, índice TGI, fracción de cobertura vegetal; índice VARI; bosque seco.

ABSTRACT

Resource islands (RI) are crucial vegetation arrangements in arid and semi-arid zones, and understanding their structure and dynamics is vital for comprehending their role in ecosystem services supply. Fieldwork with conventional methodologies is limited due to climatic conditions and technical difficulties. Therefore, evaluating alternative indirect methodologies based on geospatial data capture can increase information availability and facilitate study. In this study, we analyzed the dynamics of interannual structural change in IR of a semiarid zone of the La Guajira Peninsula. The methodological strategy involved GIS analysis of RGB orthophotomosaics acquired by a drone or UAV. Interannual changes associated with vegetation cover fraction were estimated using the VARI index, and chlorophyll content using the triangular greenness index in GIS. The results depict a map describing the effect of increased water availability in a year with a climatic anomaly on vegetation cover. Furthermore, the triangular greenness index allowed an inference about the role of water in nitrogen assimilation, reflecting an increase in chlorophyll production. Finally, GIS tools enable obtaining geospatial data describing the structure and some biological functions in a less time- and cost-intensive manner compared to traditional methodologies, allowing systematic monitoring of ecological assets such as vegetation in the IR.

Keywords: VANT, Remote sensing, Resource islands, Vegetation indices, IVT Index, Land cover fraction; VARI Index; dry forest.

Recibido: 10 de octubre de 2023

Aceptado: 1 de diciembre de 2023

Publicado: 19 de diciembre de 2023

Derechos de autor 2023: Jairo Cesar Camargo
Mendoza, Jairo Rene Escobar Villanueva, Marisol
Santos-Acevedo, Nelson Valero Valero



INTRODUCCIÓN

El conocimiento sobre la vegetación es fundamental para el estudio de ecosistemas, juega un papel importante en el mantenimiento de los recursos fauna, suelo, así como en el paisaje y el funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos. En los ecosistemas áridos la vegetación se manifiesta usualmente como patrones de parches de agrupaciones vegetales las cuales están dispersas en una matriz de suelo carente de vegetación o cubierto por costras microbianas; a estas agrupaciones se les conoce como islas de recursos (IR) o islas de fertilidad, cuya estructura suele estar constituida principalmente por arboles de especies leguminosas y plantas con características xerófitas, adaptadas a las condiciones ambientales en las que se encuentran. Las (IR) en estos ecosistemas, permiten la captura y almacenamiento de carbono, brindan protección a los suelos contra la erosión y la desertificación y contribuyen al ciclaje de nutrientes, el resultado de estos efectos es la acumulación y enriquecimiento de recursos en el suelo, además de generar un microambiente más favorable para la biota (Muñoz Iniestra et al., 2017).

Las IR son el resultado de la acumulación de agua, partículas de suelo y nutrientes, lo cual crea microecosistemas que presentan una estabilidad estructural compleja (Karlin et al., 2021), capaz de soportar una mayor diversidad y abundancia de plantas (Moncayo-Riascos & Gálvez-Cerón, 2018). Debido a que modifican el suelo química y físicamente, regulan la cantidad y disponibilidad de nutrientes y agua, así como su funcionamiento; y gracias a su capacidad para participar en los ciclos biogeoquímicos, en conjunto con los microorganismos que están presentes en el suelo, hace que tengan un papel importante para la conducción y distribución de nutrientes a su alrededor (Li et al., 2023). Es por esto que las islas de recursos son consideradas formaciones vegetales con una alta importancia para la conservación (Díaz et al., 2020).

Dada la importancia de las IR en los ecosistemas áridos o semiáridos y su potencial, es necesario agilizar su estudio y por eso se propone utilizar sistemas de información geográfica (SIG), con los cuales es posible realizar múltiples análisis sobre la vegetación utilizando imágenes satelitales como LANDSAT, y con la combinación de diferentes bandas obtener productos, con los cuales se puede estimar la cobertura del suelo y de la vegetación dentro de una zona amplia (Brito & Cumandá, 2021).

Con este propósito, una de las herramientas más versátiles son los drones, cuya gran capacidad para generar datos lo posiciona como una tecnología prometedora para mejorar la comprensión de los cambios en composición, estructura y función de un ecosistema (Almeida et al., 2021) gracias a que esta herramienta permite recorrer, dependiendo del dispositivo, más de mil hectáreas en una hora, lo hace ideal para la monitorización de incendios forestales, distribución de individuos y estudio de vegetación (González et al., 2016). También se utilizan para evaluar el crecimiento y estado de las plantas al aplicar diversos índices, que permiten determinar de manera rápida aspectos básicos de la calidad y el desarrollo de la vegetación (Rosero et al., 2021).

Los estudios que relacionan la cobertura vegetal con ortomosaicos RBG obtenidos a partir de vehículos aéreos no tripulados (VANT) ofrecen grandes posibilidades para adquirir de forma rápida y sencilla datos de campo, para un mapeo de la vegetación de manera eficiente (Candiago et al., 2015), por lo tanto, realizar estudios mediante ortoimágenes derivadas de VANT en islas de recursos permitiría conocer cómo se comportan estos sistemas durante las diferentes épocas climáticas y sus cambios, facilitando su conocimiento, monitoreo y seguimiento.

Sin embargo, a pesar de que existen estudios que relacionan la vegetación con drones a nivel nacional, en el departamento de La Guajira son escasos los estudios que involucran este tipo de herramienta en el monitoreo de ecosistemas, debido a la poca disponibilidad de información acerca del uso y manejo de

metodologías adecuadas que permitan estimar la estructura de la vegetación, así como calcular la biomasa, o la clorofila. Con este estudio se buscó diseñar un protocolo de seguimiento de IR basado en imágenes RGB a partir de un VANT con el fin de medir variables como el contenido de clorofila y analizar multitemporalmente los posibles cambios que pueden ocurrir dentro de un área determinada mediante, mediante un SIG. Como principal contribución del estudio, se pretende agilizar la toma de datos respecto a las metodologías tradicionales, posibilitando el aumento en la frecuencia de seguimiento y en el número de áreas monitoreadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la Alta Guajira en el área rural del municipio de Uribia, en inmediaciones del km 62 en el resguardo Isirruwo, ubicado en las coordenadas $11^{\circ}35'37.46''N$; $72^{\circ}19'28.61''O$ (Figura 1). En esta área se realizaron dos vuelos de dron, dentro de la zona resaltada en la Figura 1 C, se realizó un análisis interanual para la época de lluvia tanto del 2021 como del 2022, siendo este último un año con una anomalía climática que consistió en un aumento considerable de la precipitación, por la presencia del fenómeno de La Niña que se extendió hasta el 2023.

La planificación del vuelo se realizó con el software "Agisoft Metashape Profesional" en el cual se trazó una ruta en transectos lineales para el dron "PHANTON 3 ADVANCED". Con los vuelos llevados a cabo, se construyeron dos mapas de la zona de estudio, luego se obtuvieron las autoimágenes correspondientes, mediante la correlación estereoscópica automatizada de puntos comunes según lo planteado por Rimolo-Donadio, et al. (2021).

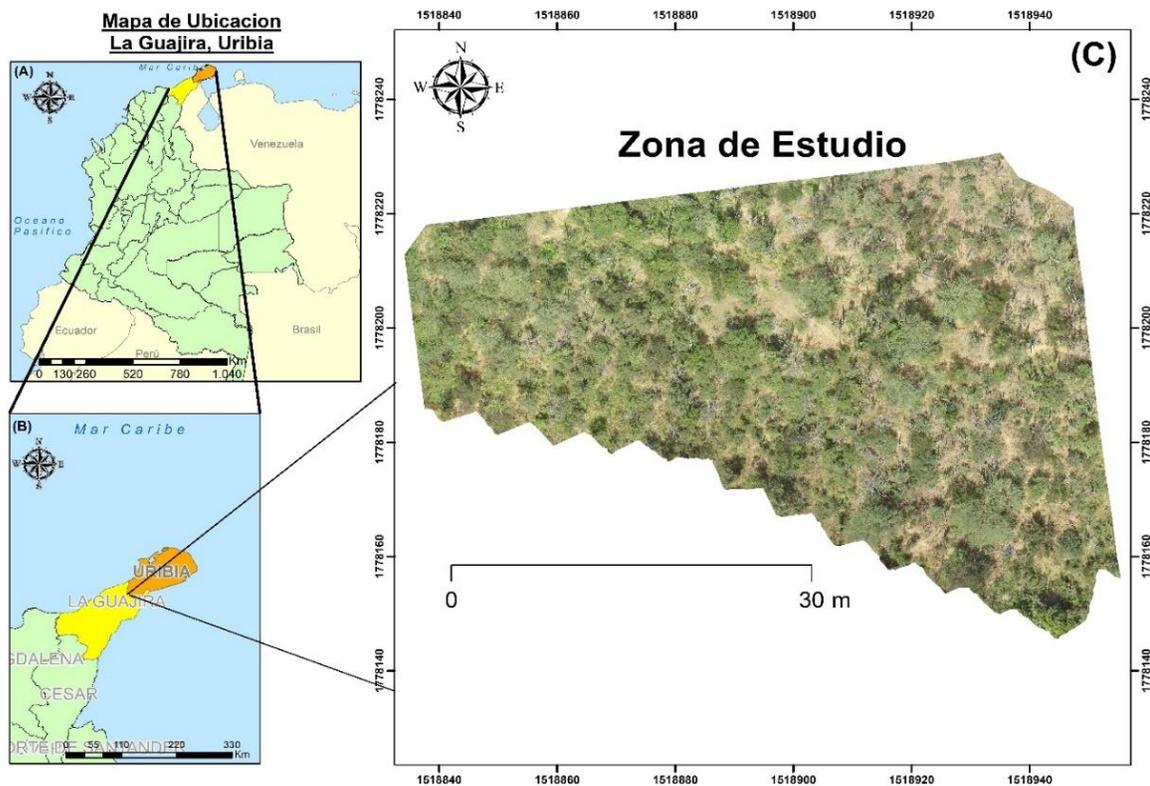


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio en el municipio de Uribia, resguardo Isirruwo, departamento de La Guajira.

Cálculo de los índices de vegetación

El análisis de la cobertura vegetal (CV), se realizó en un SIG mediante el uso del software ArcGIS 10.8, en el cual a partir de la ortoimagen procesada por la correlación estereoscópica, y las bandas del espectro visible o RGB que la compone, se realizó el cálculo mediante la calculadora ráster del software del índice de resistencia atmosférica visible o VARI (Gitelson et al., 2002).

$$VARI = \frac{Green - Red}{Green + Red - Blue}$$

Una vez obtenido el nuevo mapa, se realizó una clasificación supervisada mediante los valores arrojados por el cálculo y se obtuvo un mapa con 4 coberturas (suelo desnudo, materia orgánica, vegetación sana y estresada) el cual transformó la imagen ráster a formato de shapefile (polígonos), para la obtención del área total de la cobertura del suelo desnudo y de la cobertura vegetal. La estimación de la clorofila se obtuvo también, con la calculadora ráster del software en el cual se calculó el índice verdor triangular o TGI (Hunt et al., 2011), del cual se obtuvo un mapa con estimaciones de la clorofila de la zona en donde está presente la vegetación.

$$TGI = Green - (0,39 * Red) - (0,61 * Blue)$$

Análisis de datos

Los datos de días con lluvia y temperatura correspondientes a noviembre de 2021 y 2022 se obtuvieron de la base de datos de IDEAM (<http://www.ideam.gov.co>) y, los datos de precipitación mensual de la plataforma satelital CRHS data portal (<https://chrsdata.eng.uci.edu/>), con el fin de comparar el comportamiento de esas variables en ambos años y analizar el efecto que tuvo una mayor disponibilidad hídrica en el área de estudio.

A partir del índice VARI se realizó una matriz de confusión para medir la relación existente entre los tipos de cobertura con los valores de los píxeles obtenidos por el cálculo del índice, en el cual a partir de las firmas espectrales obtenidas (clasificación supervisada), se determinaron cuatro coberturas diferentes: suelo desnudo (color rojo), materia orgánica (color naranja), vegetación sana (color verde oscuro) y vegetación estresada (color verde fosforescente) y se marcaron 160 puntos distribuidos al azar en el mapa (40 por cada cobertura) realizando un conteo de coincidencias entre las frecuencias de los valores de los píxeles (precisión automática) con las coberturas obtenidas (precisión de usuario). Una vez obtenida esta matriz de confusión se realizó el cálculo del índice Kappa para comparar la precisión automática con la precisión del usuario, con el fin de determinar qué tan viable es el uso de la metodología para el estudio de IR.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se muestra el producto final (Figura 2) que se obtuvo de la correlación estereoscópica automatizada y el recorte del área de coincidencia entre ambos mapas con una discrepancia posicional de 5 metros entre los mapas debido al error típico que tiene el GPS, en el cual se observan las ortoimágenes, las cuales están compuestas por las bandas del espectro visible y la escala a que se tomaron (30 m).

Realizando un análisis de la imagen mediante su conversión a shapefile, se evidencio la distribución de la cobertura del suelo y la vegetación para la misma época (Figura 3), sin embargo, en el mapa se muestran múltiples áreas en las cuales no se pudo establecer si pertenece a la cobertura del suelo o de vegetación, se estableció que estas áreas corresponden a la incertidumbre que se generó en los mapas.

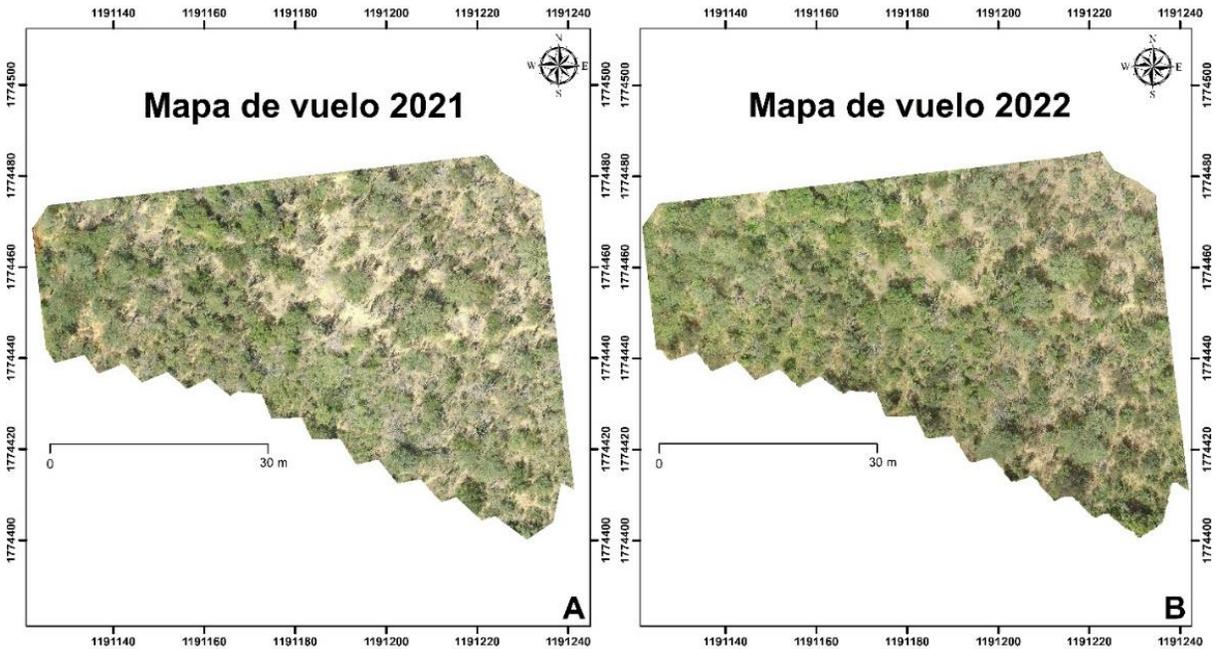


Figura 2. Mapa del área donde se realizó el vuelo en noviembre de 2021 y de 2022. A: vuelo de 2021; B: vuelo de 2022.

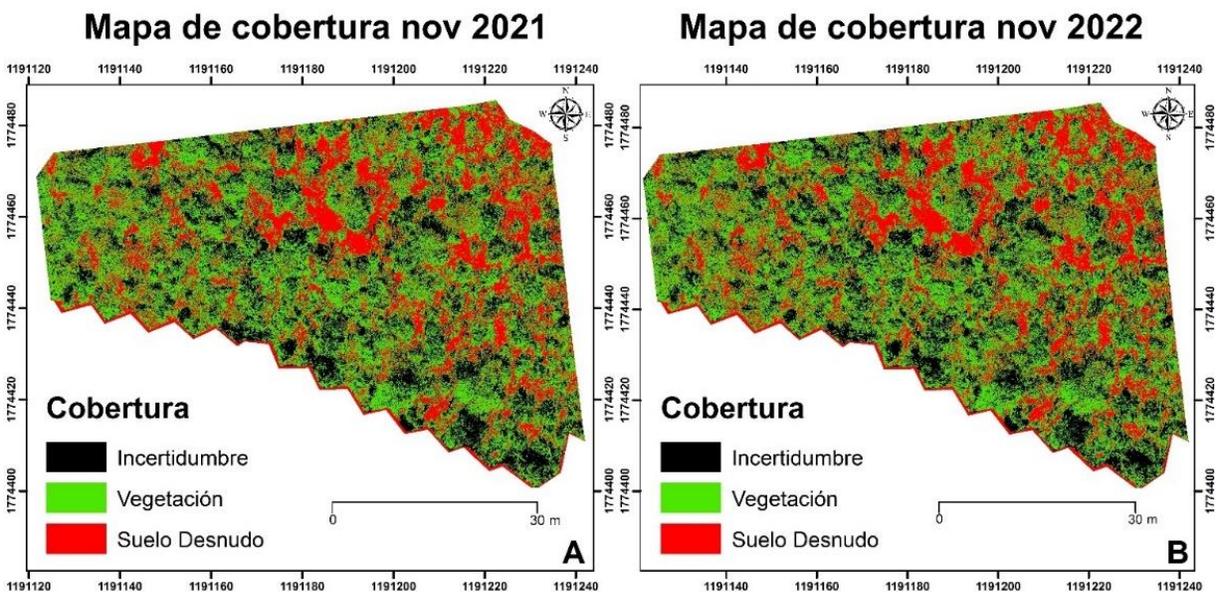


Figura 3. Mapas de cobertura del suelo desnudo y la vegetación para los vuelos del noviembre 2021 y 2022. A: noviembre, 2021; B: noviembre, 2022.

Comparando los mapas obtenidos de esta clasificación, se encontró que la cobertura vegetal para noviembre de 2022 se incrementó aproximadamente un 9% (Figura 4) con respecto a noviembre de 2021. Esto generó un aumento en la incertidumbre y una disminución en la cobertura del suelo desnudo, debido al aumento de la CV, mostrando que la anomalía en los días con lluvia reportadas para noviembre de 2022 tuvo un ligero efecto positivo en la vegetación. Dado que durante la estación seca el factor que limita el desarrollo y sobrevivencia de las plantas es el agua, mientras que en la estación húmeda la actividad de las plantas se ve favorecida (Guerra-Martínez et al., 2020), similar a lo encontrado en este trabajo para noviembre del 2022 en donde la vegetación se vio favorecida por el aumento en la precipitación con respecto al mismo mes del 2021.

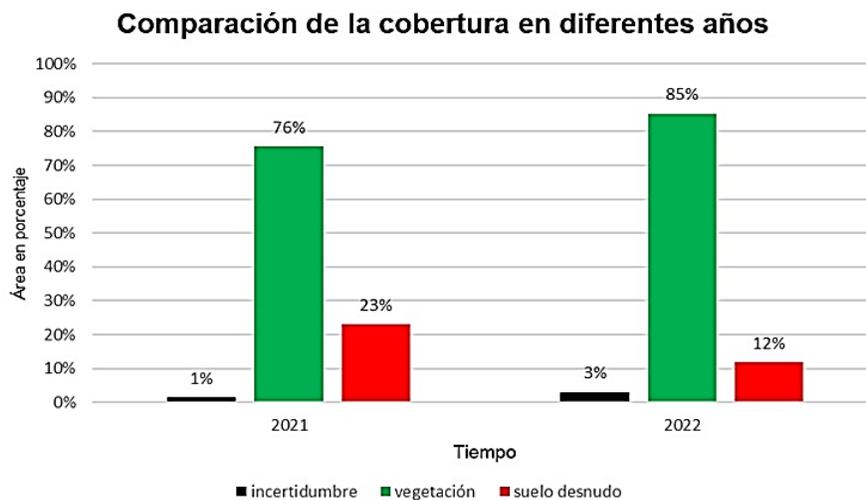


Figura 4: Clasificación y comparación de la cobertura vegetal del área de estudio en noviembre de 2021 y de 2022.

Aplicando el índice VARI se obtiene un mapa que mide de manera detallada la cobertura del suelo y de la vegetación, a partir de un gradiente de colores, con el cual se puede interpretar como es la distribución de las diferentes coberturas: suelo desnudo (color rojo), materia orgánica (color naranja), vegetación sana (color verde oscuro) y vegetación estresada (color verde claro). Los rangos de este índice permiten detectar zonas de vegetación donde las plantas pueden estar en condiciones de estrés (verde claro), debido a las condiciones ambientales en el que se encuentran.

Según lo descrito por Gitelson (2002), los valores que arroja el índice VARI se encuentran estandarizados desde -1 hasta el 1; los valores cercanos o superiores a (-0,40) corresponden en el mapa a las zonas donde se refleja con mayor intensidad la banda roja, esto indica la ausencia de la vegetación (color rojo), mientras que cuando este valor negativo es cercano a 0 muestra las zonas donde se reflejan las bandas roja y verde, la primera con una menor intensidad haciendo referencia a las hojas secas que están en el suelo, ramas caídas entre otras cosas que hacen parte de la materia orgánica (color naranja).

Por otra parte, cuando los valores se alejan de 0 y tiende a 1, indica la presencia de vegetación, sin embargo, esta puede estar sometida a estrés ya sea por déficit hídrico, nutricional o por radiación solar (coloración verde fosforescente), lo anterior porque se refleja con la misma intensidad la de luz verde y roja, por último, y finalmente cuando la banda verde refleja con mayor intensidad vemos una parte que corresponde a una vegetación más sana y densa (coloración verde oscura) (Figura 5).

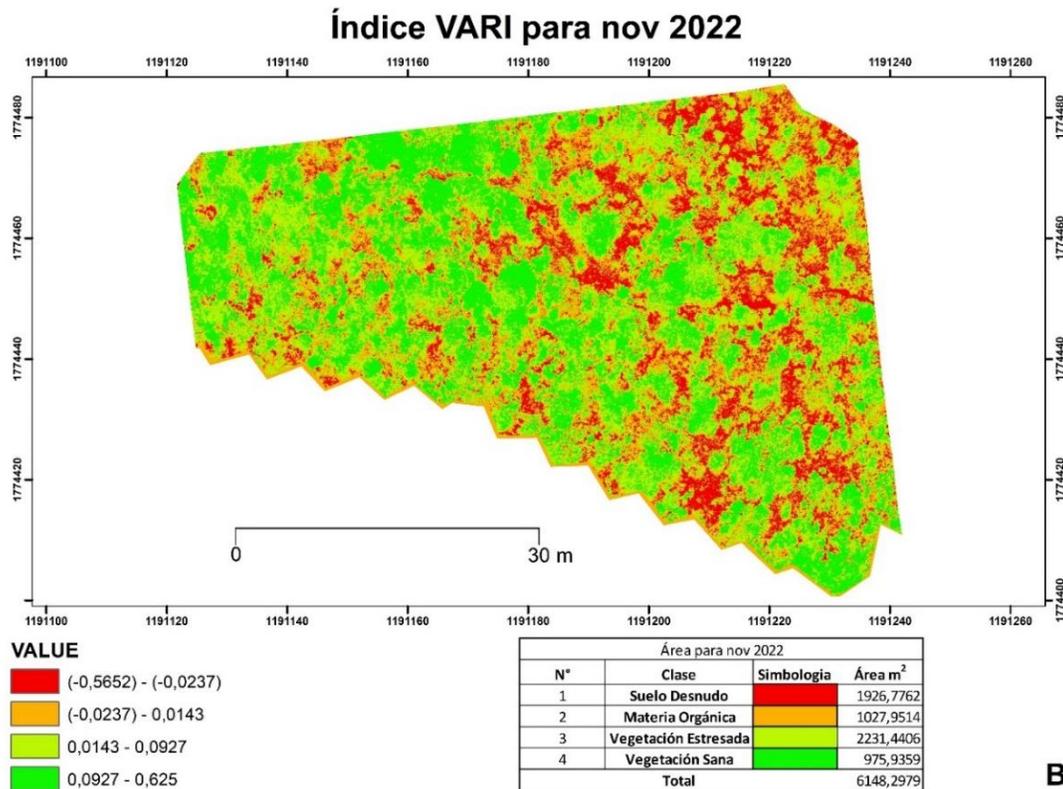
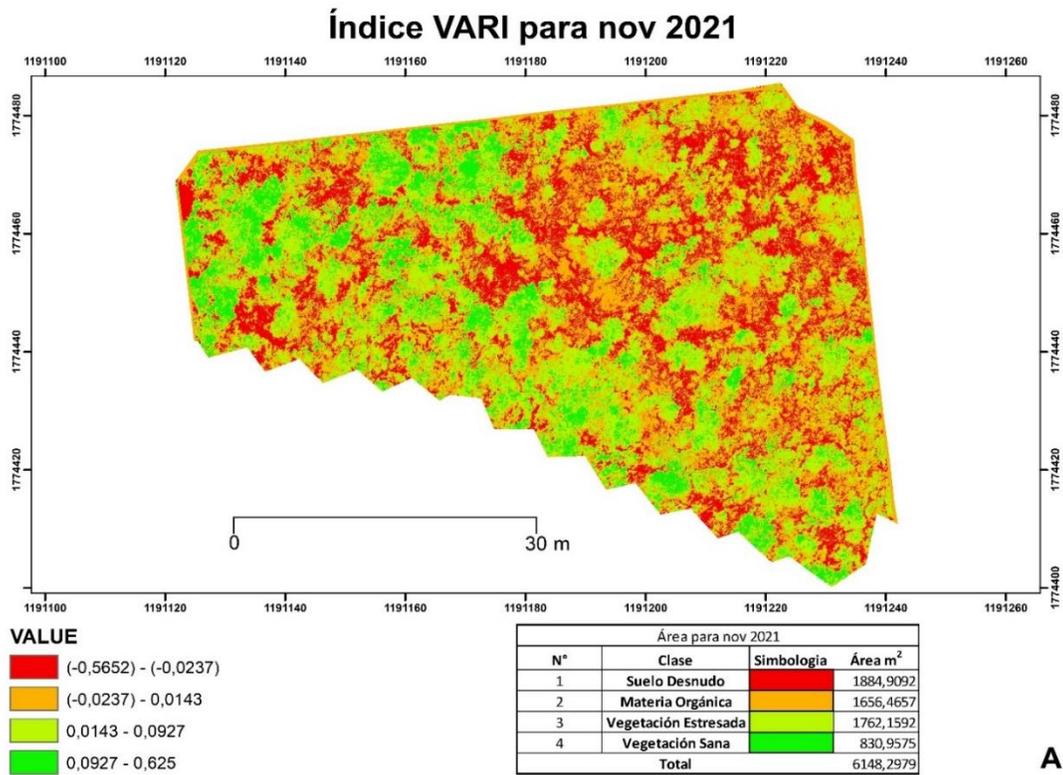


Figura 5. Cálculo del Índice VARI para los mapas (A) noviembre de 2021 y (B) noviembre de 2022.

Realizando la matriz de confusión de los datos que se obtuvieron de la clasificación supervisada que se hizo utilizando como base el índice VARI, mostró que el software pudo separar las diferentes coberturas a partir de los valores de los píxeles arrojados por el índice, permitiendo obtener cuatro diferentes coberturas (suelo desnudo, materia orgánica, vegetación sana y vegetación estresada). En cuanto a la relación entre los datos automatizados del software (precisión automática) con la clasificación realizada por el usuario (precisión del usuario), se estableció que el porcentaje de precisión fue del 98,8 % (Tabla 1), lo que indicó que los rangos de valores de cada uno de los píxeles expuestos en la Figura 5 están relacionado a un tipo de cobertura diferente.

Por otro lado, el índice Kappa permitió determinar la concordancia que presentaron los valores tanto de la precisión automática con la del usuario, validando la metodología utilizada en este estudio. La matriz de confusión obtenida a partir de los mapas de noviembre de 2021 y de 2022, indica un rendimiento estable de la metodología y el valor del índice Kappa (0,983) mostró una concordancia óptima, con lo cual se puede considerar que la fiabilidad para el uso de esta herramienta en el estudio de IR es alta, y que la metodología que se empleó en este estudio en zonas semiáridas resulta adecuada para obtener datos de manera rápida que permitan describir lo que está ocurriendo en una zona amplia, reduciendo el esfuerzo en campo y el tiempo que se emplea para la toma de datos mediante metodología tradicionales.

Tabla 1. Matriz de confusión e índice Kappa para la clasificación supervisada del índice.

CLASE	Vegetación sana	Vegetación estresada	Materia orgánica	Suelo desnudo	Total	Precisión usuario	Kappa
Suelo desnudo	40	0	0	0	39	1	0
Materia orgánica	1	39	1	0	42	0,952	0
Vegetación estresada	0	0	40	0	39	1	0
Vegetación sana	0	0	0	39	40	1	0
Total	40	40	40	40	160	0	0
Precisión automática	0,975	1	0,975	1	0	0,988	0
Kappa	0	0	0	0	0	0	0,983

El aumento en la cobertura vegetal para el 2022 está relacionada con la disponibilidad hídrica, la cual según los datos de la plataforma CHRS data portal (Figura 6) mostró un incremento en la precipitación, en comparación con el mismo mes de 2021; incremento que pudo deberse, según los reportes, al tránsito de las ondas tropicales provenientes del océano Atlántico y al paso de los ciclones tropicales en el mar Caribe que se registraron durante el mes de octubre, los cuales pudieron haber influenciado la precipitación que se evidenció en noviembre de 2022, y que fue un 73 % mayor en comparación para el mismo mes en el 2021. Esto es importante para comprender por qué hubo un aumento en la cobertura vegetal y una disminución en la cobertura del suelo para el 2022.

En cuanto a la temperatura se observaron diferencias en el mes de noviembre y diciembre del 2021 respecto al 2022, registrando una temperatura mínima menor respecto al año anterior, mientras que la media fue igual y la máxima superior; el índice de disponibilidad hídrica alcanzó el 100% mientras que en 2021 fue del 90%, corroborando la mayor abundancia de agua durante el 2022 (Tabla 2).

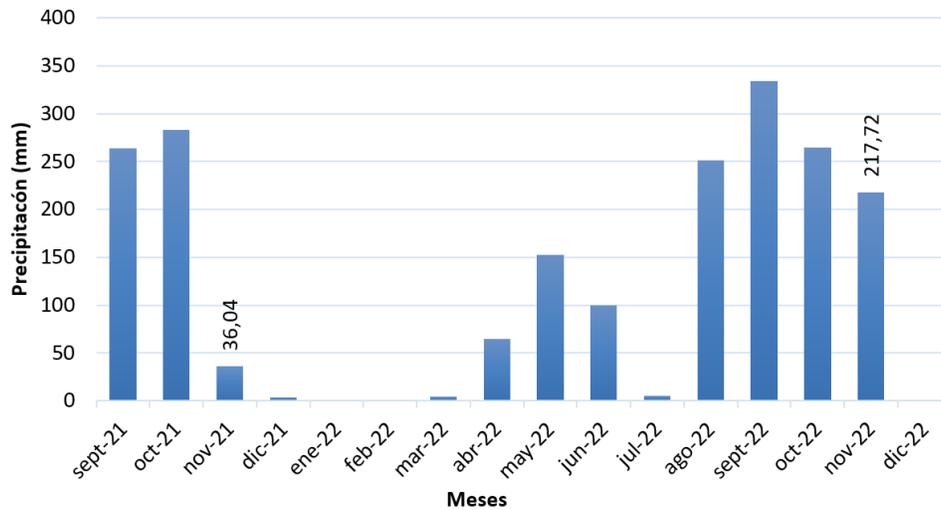


Figura 6. Precipitación bimodal registrada en la zona de estudio (Uribe - La Guajira). (<https://chrsdata.eng.uci.edu/>).

Tabla 2. Datos climatológicos registrados para los meses de octubre y noviembre para los años 2021-2022 (<http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/climatologico-mensual>)

Meses	Oct-21	Nov-21	Dic-21	Oct-22	Nov-22	Dic-22
Precipitación mensual	283,04 mm	36,04 mm	3,76 mm	264,24 mm	217,72 mm	0,0 mm
Días con llluvias	<4	<8	<4	>8	8	4
Anomalías de N. de días con llluvias	1	-3	-3	2	>6	>3
I. disponibilidad hídrica	90%	90%	60%	90%	100%	90%
T. mínima	27 °C	28 °C	27 °C	27 °C	24 °C	24 °C
T. media	28 °C	29 °C	28 °C	28 °C	29 °C	29 °C
T. máxima	31 °C	32 °C	31 °C	31 °C	34 °C	33 °C

El índice TGI muestra la estimación de la clorofila en las hojas en función del aporte de nitrógeno disponible en la planta (Hunt et al., 2011) lo que permitió detectar mediante la imagen, la disponibilidad de clorofila que las plantas están produciendo. Este índice al igual que VARI permitió detectar zonas donde la vegetación está bajo estrés, sin embargo, en este caso este índice detecta de manera indirecta el estado de salud en el que se encuentra las plantas; las áreas que tienen una coloración verde más clara se interpretaron como las zonas en donde la vegetación no absorbe suficiente nitrógeno y por ende produce menos clorofila, mientras que zonas verde oscuro se interpretaron como zonas con mayor producción de clorofila y por ende vegetación más sana.

En la Figura 7 se muestra que para el 2022 la producción de clorofila se incrementó, lo cual está relacionado con una mayor disponibilidad hídrica y con la abundancia de nitrógeno en el suelo. Lo anterior debido a que, al no ser el agua limitante, los microorganismos se activan favoreciendo la nitrificación y fijación de N_2 (Montaño et al., 2016), también se aumenta la disponibilidad del N para la planta, lo que explicaría la diferencia en los valores obtenidos con respecto a noviembre del 2021, en donde se observó una reducción de la áreas más sanas y menores valores de detección de clorofila.

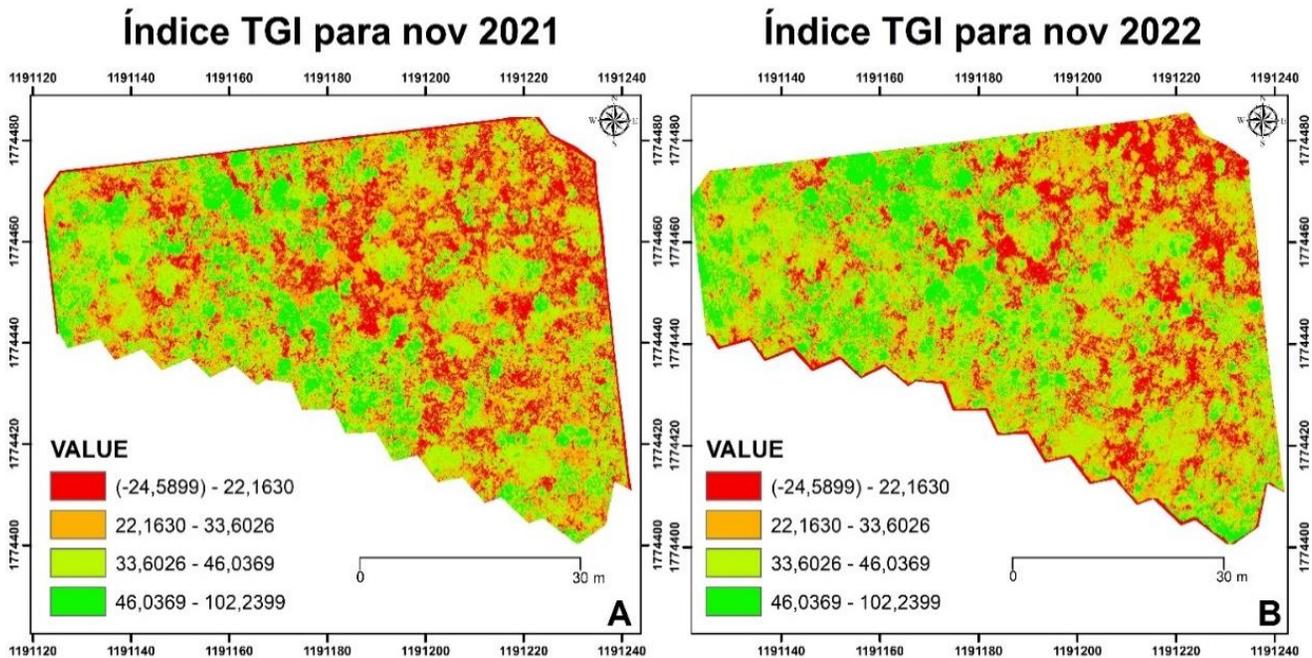


Figura 7. Índice de verdor triangular (TGI) para los vuelos de noviembre 2021 y 2022. A: Índice TGI para nov de 2021 y B: Índice TGI para nov de 2022.

Radočaj y colaboradores (2023) mencionaron que el índice VARI resulta útil en las áreas que presentan una alta interferencia atmosférica, como lo son entornos urbanos o áreas con una frecuente nubosidad, siendo el índice más fiable para este tipo de zonas, sin embargo, destacó que este índice junto con el índice TGI resultan muy útiles para la detección del estado de salud de la vegetación en zonas con condiciones variables del suelo. Por otra parte, los resultados obtenidos por Silva (2022) indica que el índice VARI, muestra que se pueden hacer inferencias acerca de parámetros fisiológicos, como el contenido de la clorofila de las hojas indicado zonas que presentan una gran actividad fotosintética. Esto se puede observar en la Figura 5 en la cual se ven diferencias en las zonas con vegetación, en donde la coloración más oscura podría estar indicando una buena actividad fisiológica de las plantas.

El índice TGI muestra los valores de clorofila registrada en los mapas al calcular la reflectancia en función del triángulo que se forma entre la banda roja, verde y azul, según lo describió Hunt (2011), este índice permite detectar deficiencias de nitrógeno, en cuanto a limitación en la cantidad disponible en una zona determinada. Este índice toma valores negativos cuando se refleja la banda roja con mucha más intensidad, mostrando la cobertura del suelo, así como los elementos que son arrastrados por el agua como la materia orgánica (Naranjo et al., 2020), o la vegetación que tiene una baja producción de clorofila debido a que no adquieren el nitrógeno necesario. Por otro lado, cuando los valores son positivos y están más cercanos a 0 muestra la baja cantidad de clorofila en las plantas, bien sea porque están bajo estrés o muriendo (Pinto et al., 2019; De Ocampo et al., 2019). Mientras que cuando estos valores son muy altos muestra una buena producción clorofila en la planta, indicando que se encuentra en un buen estado de salud.

En este caso, la cantidad de nitrógeno en las IR, proviene de la hojarasca y materia orgánica que se va acumulando bajo los arbustos, y también del N disponible en la capa superficial del suelo y por fijación biológica (Castellanos et al., 2022), en los mapas de clorofila (Figura 7), se observó un aumento en la producción de la clorofila en algunas planta, las cuales se vieron favorecidas por una mayor fijación del N_2 ,

debido a que una mayor disponibilidad de agua, permite una mayor abundancia de este nutriente en el suelo. De esta manera se muestra que el factor limitante en este caso, donde existe una mayor cantidad de agua sería la disponibilidad de los nutrientes, lo que explicaría que no haya una mayor producción de la clorofila (Manrique et al., 2003).

CONCLUSIONES

Este estudio permitió evidenciar la factibilidad de obtención rápida de datos geoespaciales (imágenes RGB) mediante vehículos aéreos no tripulados, para realizar análisis interanuales de la vegetación y el comportamiento de la vegetación en IR frente a la disponibilidad hídrica en un área de interés.

Con el índice VARI se pudo evidenciar que una mayor disponibilidad hídrica no tuvo necesariamente un efecto mayor en el incremento de la cobertura vegetal, debido a que hay otros limitantes que interfieren, como es la disponibilidad de nutrientes.

El análisis de los mapas entre el índice TGI y VARI, muestra una semejanza entre las coberturas, lo que puede indicar que este último también se puede utilizar como un indicador del estado de salud de la vegetación.

Referente a la clorofila se pudo evidenciar que el índice TGI permite hacer una inferencia, en términos comparativos, sobre la disponibilidad del nitrógeno que hay en una zona determinada.

Finalmente se puede decir que el uso de herramientas SIG junto con imágenes RGB derivadas de un VANT, permiten obtener datos que describen atributos biológicos claves como la clorofila, de forma alternativa a las metodologías de muestreo tradicionales.

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio se llevó a cabo gracias a la financiación de la Universidad de La Guajira, mediante el proyecto "Materia orgánica y su relación con algunas características del suelo en islas de recursos en una zona semiárida en la Alta Guajira". Agradecimientos a la comunidad del resguardo Isirruwo y en particular al señor Ciro Ruiz.

LITERATURA CITADA

- Almeida, D. R. A. D., Broadbent, E. N., Ferreira, M. P., Meli, P., Zambrano, A. M. A., Gorgens, E. B., Resende, A. F., Almeida, C. T. D., Amaral, C. H. D., Corte, A. P. D., Silva, C. A., Romanelli, J. P., Prata, G. A., Papa, D. D. A., Stark, S. C., Valbuena, R., Nelson, B. W., Guillemot, J., Féret, J-B., ... & Brancalion, P. H. S. (2021). Monitoring restored tropical forest diversity and structure through UAV-borne hyperspectral and lidar fusion. *Remote Sensing of Environment*, 264, [112582]. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112582>
- Brito, A., & Cumandá, N. (2021). Herramientas SIG para el estudio de la cobertura vegetal y cambio de uso de suelo en el cantón Chunchi, provincia del Chimborazo. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20104>
- Candiago, S., Remondino, F., De Giglio, M., Dubbini, M., & Gattelli, M. (2015). Evaluating Multispectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images. *Remote Sensing*, 7(4), 4026-4047. <https://doi.org/10.3390/rs70404026>

- Castellanos, L. C. J., Buitrago, M. L. P., & Soto, L. I. C. (2022). Determinación de la diversidad taxonómica y funcional de hongos a través de metagenómica en isla de recursos y su influencia en la degradación de materia orgánica en ambiente semiárido de La Guajira. <https://repositorio.unicolmayor.edu.co/handle/unicolmayor/5713>
- Díaz, R. A. R. (2020). Análisis espacial de coberturas vegetales presentes en comunidades indígenas ubicadas en el municipio de Uribia, departamento de La Guajira, Colombia. <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/5904>
- Gitelson, A. A., Stark, R., Grits, U., Rundquist, D., Kaufman, Y., & Derry, D. (2002). Vegetation and soil lines in visible spectral space: A concept and technique for remote estimation of vegetation fraction. *International Journal of Remote Sensing*, 23(13), 2537–2562. <https://doi.org/10.1080/01431160110107806>
- González, A., Amarillo, G., Amarillo, M., & Sarmiento, F. (2016). Drones Aplicados a la Agricultura de Precisión. *Publicaciones e Investigación*, 10, 23. <https://doi.org/10.22490/25394088.1585>
- Guerra-Martínez, F., García Romero, A., & Martínez Morales, M. A. (2020). Evaluación de la resiliencia ecológica de los bosques tropicales secos: Una aproximación multiescalar. *Madera y Bosques*, 26(3). <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2631983>
- Hunt, E. R., Doraiswamy, P. C., McMurtrey, J. E., Daughtry, C. S. T., Perry, E. M., & Akhmedov, B. (2011). A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.07.020>
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos. Consultado: (28/03/2023). <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- Karlin, M. S., Coirini, R., Ringuet, A., Bernasconi Salazar, J., Cora, A., Contreras, A., Bravo, M. B., & Buffa, E. (2021). Evaluación biofísica de islas de fertilidad en el Chaco Árido (Argentina). *AgriScientia*, 38(1), 1–13. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v38.n1.30529>
- Li, S., Wang, C., Yang, S., Chen, W., Li, G., Luo, W., Wei, G., & Chen, C. (2023). Determining the contribution of microbiome complexity to the soil nutrient heterogeneity of fertile islands in a desert ecosystem. *Science of The Total Environment*, 857, 159355. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159355>
- Manrique, E. (2003). Los pigmentos fotosintéticos, algo más que la captación de luz para la fotosíntesis. *Ecosistemas*, 12. Metternicht, G. (2003). Vegetation indices derived from high-resolution airborne videography for precision crop management. *International Journal of Remote Sensing*, 24(14), 2855–2877. <https://doi.org/10.1080/01431160210163074>
- Moncayo-Riascos, M. C., & Gálvez-Cerón, A. (2018). Islas de fertilidad: Una revisión sistemática de su estructura y operación. *Idesia (Arica)*, 36(1), 115–122. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292018000100115>
- Montaño, N. M., Ayala, F., Bullock, S. H., Briones, O., García Oliva, F., García Sánchez, R., Maya, Y., Perroni, Y., Siebe, C., Tapia Torres, Y., Troyo, E., & Yépez, E. (2016). Almacenes y flujos de carbono en

ecosistemas áridos y semiáridos de México: síntesis y perspectivas. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 39-59. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57344471003>

- Muñoz Iniestra, D. J., Chávez Mosqueda, M., Godínez Álvarez, H. O., & Cuéllar Arellano, N. A. (2017). Cambios edáficos en islas de fertilidad y su importancia en el funcionamiento de un ecosistema del valle de Tehuacán Puebla, México. *Revista Terra Latinoamericana*, 35(2), 123. <https://doi.org/10.28940/terra.v35i2.142>
- Naranjo, O. L. (2020). Estrategias de parametrización de vuelo de un equipo RPAS para la generación de Ortomosaicos a partir de sensores multiespectrales y RGB. <https://repositorio.ucm.edu.co/handle/10839/3438>
- de Ocampo, A. L. P., Bandala, A. A., & Dadios, E. P. (2019). Estimation of Triangular Greenness Index for Unknown Peak Wavelength Sensitivity of CMOS-acquired Crop Images. 2019 IEEE 11th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM), 1-5. <https://doi.org/10.1109/HNICEM48295.2019.9072796>
- Pinto, J., Rueda-Chacón, H., & Arguello, H. (2019). Classification of Hass avocado (*Persea americana* mill) in terms of its ripening via hyperspectral images. *Tecnológicas*, 22(45), 109-128. <https://doi.org/10.22430/22565337.1232>
- Radočaj, D., Šiljeg, A., Marinović, R., & Jurišić, M. (2023). State of Major Vegetation Indices in Precision Agriculture Studies Indexed in Web of Science: A Review. *Agriculture*, 13(3), 707. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030707>
- Rimolo-Donadio, R., Arriola Valverde, S., Umaña Soto, J., López Sampson, A., Sepúlveda, N., Villalobos Avellán, L. C., Monge Mora, J. C. & Somarriba, E. (2021). *Fotogrametría Digital con Sistemas Aéreos no Tripulados para el Análisis de Sistemas Agroforestales*. Turrialba, C. R. CATIE, 2021. 66 p. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/343>
- Rosero, A. (2021). Evaluación del uso de drones como herramienta de apoyo para un efectivo control y monitoreo de páramos en Colombia. <https://hdl.handle.net/10495/24678>
- Silva, M. F., Maciel, G. M., Gallis, R. B., Barbosa, R. L., Carneiro, V. Q., Rezende, W. S., & Siquieroli, A. C. S. (2022). High-throughput phenotyping by RGB and multispectral imaging analysis of genotypes in sweet corn. *Horticultura Brasileira*, 40(1), 92-98. <https://doi.org/10.1590/s0102-0536-2022012>

BIODATA

Jairo Cesar Camargo Mendoza: Estudiante de Biología, Universidad de La Guajira, Colombia.

Jairo Rene Escobar Villanueva: Docente de la Facultad de Ingenierías, Universidad de La Guajira. Licenciado en Ingeniería Ambiental de la Universidad de La Guajira (Colombia) en 2007. Maestría en Ciencia y Tecnología Ambiental de la Universidad Rey Juan Carlos (España) en 2009. Doctor en Investigación Ambiental, Modelización y Evaluación de Riesgos de la Universidad Politécnica de Madrid (España) en 2020 (Tesis Laureada). Sus intereses de investigación se centran en la aplicación de la geomática con tecnología de drones UAV en estudios de modelización de inundaciones urbanas.

Marisol Santos-Acevedo: Bióloga, con Maestría en Gestión Ambiental. Orientación: Ciencia y Tecnología Marina. Profesional con conocimientos en el área de ecología trófica y sistemática de peces de agua dulce, estuarinos y marinos, bioprospección continental y marina, ensayos de bioactividad con extractos de organismos marinos, ensayos de toxicidad, cultivo de organismos marinos en condiciones de laboratorio, diseño de sistemas de recirculación, con amplia trayectoria en elaboración y manejo de proyectos y edición de informes y publicaciones. Docente en la Universidad de La Guajira, Riohacha, Colombia. Publicaciones recientes: (2022). The state of the art of marine natural products in Colombia. *Revista Colombiana de Química* (10.15446/rev.colomb.quim.v51n1.100644); (2022). Diversity of cultivable bacteria from deep-sea sediments of the Colombian Caribbean and their potential in bioremediation. *Antonie van Leeuwenhoek* (10.1007/s10482-021-01706-4); (2021). Inclusión de aceite de linaza en un alimento comercial suministrado a *Eugerres plumieri*. *Revista Investigación Pecuaria* (10.22267/revip.2181.24).

Nelson Valero Valero: Biólogo, M.Sc. en Microbiología. Doctor en Ciencias Agrarias. Experiencia en interacciones ecofisiológicas suelo planta microorganismo, agricultura ecológica, materia orgánica del suelo manejo ecológico del suelo tropical y recuperación de suelos en zonas áridas, ecofisiología vegetal en zonas semiáridas. Docente Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas, Universidad de La Guajira. Publicaciones recientes: (2023). Total auxin level in the soil–plant system as a modulating factor for the effectiveness of PGPR inocula: a review. (2023) Valero, N. O., Martínez, K. A. C., & Gómez, J. A. G. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* (10.1186/s40538-022-00370-8). (2022). Beleño-Carrillo et al., Gómez-Gómez, L. & Valero, N.O. Bacillus mycoides y ácidos húmicos como bioestimulantes de frijol caupí bajo estrés por salinidad. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* (10.31910/rudca.v25.n2.2022.1974).